

## ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВОЙНЫМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА РЕЖИМ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа, Н.Ю. Рубан

Научный руководитель - профессор А.С. Гусев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

При воспроизведении модели асинхронного генератора с двойным питанием зачастую пренебрегают переходными процессами в роторе [1], получая тем самым так называемую модель 3-го порядка. Однако, чтобы учесть переходные процессы ротора, требуется детальное моделирование преобразователя, включая полупроводниковые переключатели и контуры управления током. Результатом будут постоянные времени, которые значительно ниже, чем 100 мс – типичная минимальная постоянная времени, используемая в ПВК расчета электрохимических процессов, что ограничивает применимость таких моделей в указанных ПВК. Полученная модель будет намного более сложной и, поэтому для упрощения, в ПВК расчета электрохимических процессов VSC с контурами управления по току зачастую представляют источниками тока.

Однако 3-й порядок, по сравнению с 5-м, обычной модели асинхронного генератора имеет значение с точки зрения поведения электрических значений генератора и устойчивости по напряжению [2]. Один из ведущих производителей ветрогенераторов – фирма Vestas согласилась с тем, что использование модели АГДП 3-го порядка в исследованиях электрохимических переходных процессов приводит к неверным результатам, потому что переходные процессы основной частоты в токах машины игнорируются. Этот недостаток может привести к вводящим в заблуждение выводам относительно действий преобразователя – блокировки из-за перегрузки по току [3, 4]. Этим было доказано, что для исследования устойчивости, по крайней мере, необходима модель АГДП 5-го порядка.

Система уравнений 5-го порядка для АГДП выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} & V_{dr} &= R_r \cdot I_{dr} - s \cdot \omega_s \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} &= R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} & V_{qr} &= R_r \cdot I_{qr} + s \cdot \omega_s \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{2H_m} (T_m - T_e) & T_e &= \psi_{ds} \cdot I_{qs} - \psi_{qs} \cdot I_{ds} \end{aligned}$$

где  $s$  – скольжение,  $v$  – напряжение,  $i$  – ток,  $R$  – сопротивление и  $\psi$  поток. Все в относительных единицах. Нижние индексы  $d$  и  $q$  обозначают соответственно прямую и квадратурную составляющие и индексы  $r$  и  $s$  для ротора и статора соответственно.

Скольжение может быть определено по формуле:

$$s = 1 - \frac{p \omega_m}{2 \omega_s}$$

где,  $\omega_m$  – угловая частота вала турбины-генератора (ротора),  $p$  – число полюсов

Для учета потерь в стали необходимо добавить эквивалентное сопротивление потерь  $R_m$  и ток через это сопротивление согласно рисунку:

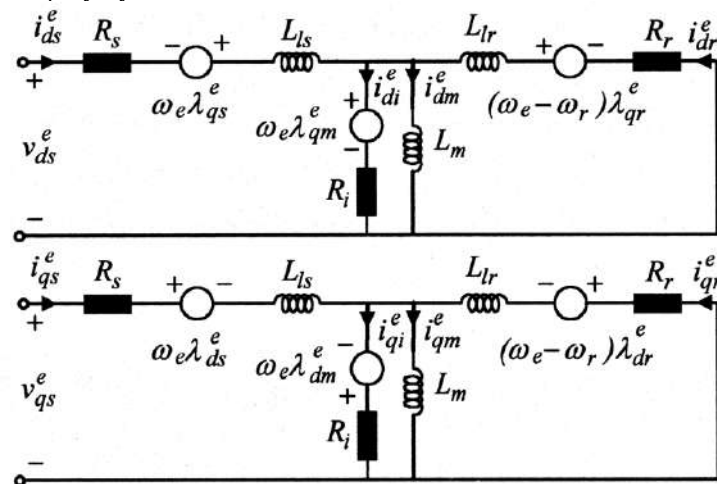


Рис. 1 Схема замещения асинхронного генератора с двойным питанием

Таким образом полная система уравнений становится моделью 7-го порядка:

$$0 = i_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_s - p\Omega_m)\Psi_r$$

$$0 = i_{Rm} R_m + \frac{d\Psi_m}{dt} + j\omega_s \Psi_m$$

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r + L_m i_{Rm}$$

$$\Psi_r = (L_m + L_r \lambda_1) i_r + L_m i_{Rm} + L_m i_s$$

$$\Psi_m = L_m i_s + L_m i_r + L_m i_{Rm}$$

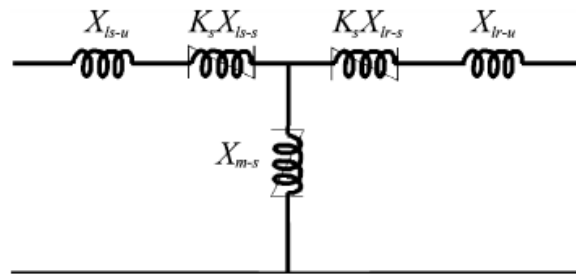
В этих уравнениях  $\psi$  - потокосцепление, а  $L$  - индуктивность. Индексы  $m$ ,  $r$  обозначают взаимный и ротора соответственно. Кроме того, учет насыщения основного магнитного потока также изменит систему уравнений.

При этом насыщение основного потока учитывается заменой реактивного сопротивления в магнитной цепи на соответствующее значение в состоянии насыщения, которое определяется согласно выражениям:

$$X_{ms} = \begin{cases} X_{mu}, & i_m < 0.5 \text{ pu} \\ K_m X_{mu}, & 0.5 \leq i_m \leq 5 \text{ pu} \end{cases}$$

где  $K_m$  – коэффициент насыщения

Чтобы представить эффект насыщения потока рассеяния, реактивные сопротивления статора и ротора ( $X_{ls}$ ,  $X_{lr}$ ) разделяют на их насыщенные компоненты ( $X_{ls-s}$ ,  $X_{lr-s}$ ) и ненасыщенные компоненты ( $X_{ls-u}$ ,  $X_{lr-u}$ ).



**Рис. 2** Схема замещения для учета насыщения основного потока и потока рассеяния

При этом  $K_s$  может быть найден по формуле [5]:

$$K_s = \begin{cases} 1.0, & I \leq I_{sat} \\ \frac{2}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma}} \right) + \lambda \sqrt{1-\gamma} \right], & I > I_{sat} \end{cases}$$

Эффект насыщения потока рассеяния заключается в значительном увеличении токов статора и ротора генератора в течение переходного процесса [6].

Проведенный анализ различных вариантов моделей асинхронного генератора с двойным питанием позволил сделать вывод, что для задач оценки влияния ветроэнергетических установок на режим работы энергосистем необходима как минимум модель 7-го порядка, учитывающая насыщение основного потока и потока рассеяния электрической машины.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант №МК-1675.2019.8

#### Литература

1. Fujimitsu, M., Komatsu, T., Koyanagi, K., Hu, K., Yokoyama, R. (2000) 'Modeling of Doubly-fed Adjustable-speed Machine for Analytical Studies on Long-term Dynamics of Power System', in Proceedings of PowerCon, Perth, pp.25–30.
2. Knudsen H., Akhmatov V. Induction generator models in dynamic simulation tools. Proceedings of the International Conference on Power System Transients IPST'99, June 20-24, 1999, Budapest, Hungary, pp. 253-259.
3. Akhmatov V., Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part II: Power system stability, Journal of Wind Engineering, 2002, to be published;
4. Akhmatov V., Modelling of variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators in short-term stability investigations, Proceedings of 3rd Int. Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, April 11-12, 2002, Stockholm, Sweden.
5. Kundur, P. (1994) Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York.
6. Hany M. Jabr\*, Narayan C. Kar Effects of main and leakage flux saturation on the transient performances of doubly-fed wind driven induction generator